



НЕЙТРАЛЛАРИ ИЗОЛЯЦИЯЛАНГАН ЭЛЕКТР ТАРМОҚЛАРИДА АВАРИЯ ҲОЛАТЛАРИНИ ОЛДИНИ ОЛИШ НАЗОРАТ ВА БОШҚАРУВ ТИЗИМИНИНГ МАТЕМАТИК МОДЕЛИ

Атауллаев Н.О.¹[0000-0002-1689-813X], **Атауллаева Н.Б.**²[0009-0007-3942-1573]

¹*Навоий давлат кончилик ва технологиялар университети, PhD., доцент,
E-mail: nodir-82@list.ru*

²*Кармана туман 2-сон Политехникуми ўқитувчиси*

Аннотация. Ушбу мақолада кончилик корхоналари энергетика тизимларида бир фазали ерга туташув ҳодисаларининг олдини олиш ва технологик жараёнларнинг режадан ташқари тўхтаб қолишининг олдини олишга қаратилган селектив назорат ва бошқарув тизимининг математик модели ишлаб чиқилган. Магнитомодуляцион датчиклар асосида нолли кетма-кетлик тоқлари ва кучланишларини аниқлаш таъминлари таҳлил қилинган. Нейтраллари изоляцияланган электр тармоқлар учун нолли кетма-кетлик эквивалент занжири тузиб, Лаплас ўзгарувчиси ёрдамида ўтказиш функцияси, импульс характеристикаси ва конволюция усули орқали тизимнинг динамик хусусиятлари олинган.

Ишлаб чиқилган математик модель бир фазали ерга туташувни чегаравий қийматлар асосида тез ва ишончли аниқлаш имконини беради. Таклиф этилган ёндашув тизимнинг барқарорлигини ошириш, юқори частотали шовқинларни филтрлаш ва селектив ўчиришни таъминлашга хизмат қилади. Натожда назорат ва бошқарув тизимининг алгоритми ҳамда имитацион моделини ишлаб чиқиш учун асос яратилган.

Калит сўзлар: бир фазали ерга туташув, нолли кетма-кетлик токи, магнитомодуляцион датчик, селектив назорат, математик модель, Лаплас ўзгарувчиси, ўтказиш функцияси, конволюция, эквивалент занжир, кончилик корхоналари энергетика тизими, аварияни олдини олиш.

Annotation. Abstract. This article develops a mathematical model of a selective control and management system aimed at preventing single-phase grounding events and preventing unplanned technological shutdowns in the power systems of mining enterprises. The principles of determining zero-sequence currents and voltages based on magnetic modulation sensors have been analyzed. For electrical networks with isolated neutrals, a zero-sequence equivalent circuit was constructed, and the dynamic properties of the system were obtained using the Laplace variable, transmission functions, pulse characteristics, and the convolution method.

The developed mathematical model allows for the rapid and reliable determination of single-phase grounding based on boundary values. The proposed approach serves to increase system stability, filter high-frequency noise, and ensure selective suppression. As a result, the basis was created for the development of an algorithm and a simulation model of the control and management system.

Key words: single-phase grounding, zero-sequence current, magnetic modulation sensor, selective control, mathematical model, Laplace variable, transfer function, convolution, equivalent circuit, mining enterprise power system, accident prevention.

Аннотация. В данной статье разработана математическая модель системы селективного контроля и управления, направленная на предотвращение однофазных заземлений в энергосистемах горнодобывающих предприятий и предотвращение внеплановых остановок технологических процессов. Проанализированы принципы определения токов и напряжений нулевой последовательности на основе магнитомодуляционных датчиков. Для электрических сетей с изолированными нейтральными была построена эквивалентная цепь нулевой последовательности и получены динамические характеристики системы с помощью передаточной функции, импульсной характеристики и метода конволюции с помощью переменной Лапласа.

Разработанная математическая модель позволяет быстро и надежно определять однофазное заземление на основе граничных значений. Предложенный подход служит для повышения устойчивости системы, фильтрации и селективного гашения высокочастотных шумов. В результате создана основа для разработки алгоритма и имитационной модели системы контроля и управления.

Ключевые слова: однофазное заземление, нулевой последовательный ток, магнитомодуляционный датчик, селективный контроль, математическая модель, переменная



Лапласа, передаточная функция, конволюция, эквивалентная цепь, энергетическая система горнодобывающих предприятий, предотвращение аварий.

Кириш

Кончилик корхоналарининг энергетика тизимларида мослаштирилган ўрнатмаларга эга бир фазали ерга туташувдан селектив назорат ва бошқарув жараёнларини моделлаштиришда унинг математик модели, алгоритми ва имитацион моделини ишлаб чиқиш зарурати юзага келади.

Ушбу жараёнларни шакллантиришда яъни, энергетика тизимларидаги авария ҳолатларини олдини олишда тармоқ параметрларини назорат қилиш, авария содир бўлган тармоқни аниқлаш ва танлаб ўчириш, технологик жараёнларни режадан ташқари тўхташларини олдини олиш имконларини берувчи назорат ва бошқарув тизимларини ишлаб чиқиш мақсадга мувофиқ[1].

Назорат ва бошқарув тизимининг таркибий қисми ҳисобланган магнитомодуляцион датчигининг ишлаш тамойилини таҳлил қилиш муҳим аҳамият касб этади, чунки у тармоқнинг кириш ва чиқиш нуқталаридаги тоқларни қуйидаги ифода орқали аниқлайди.

Услугият

Назорат ва бошқарув тизимининг асосий қисимларидан бири магнитомодуляцион датчиклари тармоқнинг кириши ва чиқишидаги тоқларни қуйидаги ифода орқали аниқланади:

$$\Delta I_{\text{дифф}} = |I_{0.\text{кириш}} - I_{0.\text{чиқиш}}|$$

Нолли кетма-кетлик тоқининг аниқлаш ифодаси бўйлама дифференциал усулини қўллаган ҳолда қуйидаги кўринишда ёзилади:

$$\Delta I_{\text{дифф}} = 3 \cdot \omega \cdot C_{\Sigma} \cdot U_{\phi}$$

Магнитомодуляцион датчиги ўзакларининг ўртача магнитланиш эгри чизигини қуйидаги ифодадалар орқали аниқлаймиз:

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= \frac{1}{k_2} \operatorname{tg} \left(\frac{1}{k_1} B_1 \right) \\ H_2 &= \frac{1}{k_2} \operatorname{tg} \left(\frac{1}{k_1} B_1 \right) \end{aligned} \right\}$$

Кончилик корхоналари энергетика тизимларида $\Delta I_{\text{дифф}}$ ҳақида маълумот олиш учун тўйиниш симметриясининг ўзгариши натижасида юзага келадиган амплитуда ёки фаза силжишини ажратиш керак, бу тизимларнинг барқарорлигини таъминлаш учун сигналларни қайта ишлаш технологиялари учун долзарбдир[2].

Бир фазали ерга туташув ҳодисасини аниқлашда ва олдини олишда назорат ва бошқарув тизими бир қанча ноаниқликларга учрайди. Бу ноаниқликларни, яъни юқори частотали шовқинларни бартараф этиш учун филтрдан фойдаланишимиз зарурати юзага келади. Магнитомодуляцион датчиги орқали аниқланаётган токни сигнал кўринишига ўзгартиришимиз керак бўлади. Сигнални таянч частота f_m га кўпайтириш учун синхрон детектор ишлатилади, натижани давр бўйича интеграллайди ва қуйидаги формула билан $\Delta I_{\text{дифф}}$ га пропорционал бўлган кучланиш аниқланади:

$$u_{\text{дет}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_2 \cdot \sin(2\pi f_m t) dt \quad (1)$$

Демодуляциядан сўнг f_m қолдиқларни олиб ташлаш учун $H(s) = \frac{1}{(1+s/\omega_c)^2}$ функцияси орқали 2-тартибли паст частотали филтрдан сигнал ўтказилади.



Энергетика тизимининг электр тармоқларида бир фазали ерга туташув ҳодисаси юзага келган вақтда нолли кетма-кетлик кучланиши қуйидаги формула орқали аниқланади:

$$U_0 = \frac{U_A + U_B + U_C}{3}$$

Нейтраллари изоляцияланган электр тармоқларда нолли кетма-кетлик кучланишини аниқлашнинг соддалаштирилган ифода қуйидагича бўлади:

$$U_0 = \frac{U_{\phi.3}}{1 + 3\omega C_\Sigma R_3}$$

Электр тармоқлардаги асимметрик режимлар назариясига кўра, ҳақиқий бир фазали ерга туташувда ҳам сиғим токи, ҳам кучланиш векторининг силжиши юзага келади, яъни:

$$U_0 = \frac{U_\phi}{\sqrt{3}(1 + 3 \cdot \omega \cdot C_\Sigma \cdot R_3)}$$

Кучланиш трансформаторининг чиқиш кучланиши нолли кетма-кетлик кучланишига U_0 га мутаносиб бўлган қуйидаги ифода орқали юзага келади:

$$U_{\text{чиқиш}} = U_0 \cdot k_t$$

Нейтраллари изоляцияланган электр тармоқларда бир фазали ерга туташув ҳодисаси юз берганда нолли кетма-кетлик токи $\Delta I_{\text{дифф}}(t)$ ҳамда кучланиш $U_0(t)$ ларнинг қийматларини аниқлаш функциясини нолли кетма-кетлик эквивалент занжири актив (R_0), индуктивлик (L_0) ва сиғим (C_0) нолли кетма-кетлик эквивалент қаршиликлари асосида амалга оширилади[3].

Нолли кетма-кетлик эквивалент занжирини тузиш учун биз аввало қуйидаги ўзгарувчиларни белгилаб оламиз:

$\Delta I_{\text{дифф}}(t)$ – нолли кетма-кетлик токи (ерга оқаётган ток), (А);

$U_0(t)$ -фаза–ер кучланиш манбаи (ерга туташган фазада), (В);

R_0 –эквивалент актив қаршилик, (Ω);

L_0 –эквивалент индуктивлик, (Н);

C_0 –эквивалент сиғими, (Ф);

s – Лаплас ўзгарувчи;

$I_0(s)$ – $\Delta I_{\text{дифф}}(t)$ ва $U_0(t)$ ларни Лаплас тенгламаси орқали ифодалаш;

p_1, p_2 – характеристик илдизлар (деноминатор полиноминал илдизлари);

τ – интеграллаш ўзгарувчиси (вақт).

1. Нолли кетма-кетлик токи $\Delta I_{\text{дифф}}(t)$ ҳамда кучланиш $U_0(t)$ ларнинг қийматларини аниқлаш функцияси қуйидаги кетма-кетликда амалга оширилади:

Энергетика тизимининг нейтраллари изоляцияланган электр тармоқларни нол кетма-кетлик бўйича эквивалент схемага келтириб оламиз: $R_0 - L_0 - C_0$ кетма-кет занжир киришда $U_0(t)$ кучланиш миқдорий қиймати қуйидагига тенг бўлади:

$$U_0(t) = U_L(t) + U_R(t) + U_C(t) \quad (2)$$

бу ерда: $U_L(t) = L_0 \frac{d i_0(t)}{dt}$ индуктивликдаги кучланиш; $U_R(t) = R_0 \Delta I_{\text{дифф}}(t)$ – резистордаги кучланиш; $U_C(t) = \frac{1}{C_0} \int \Delta I_{\text{дифф}}(\tau) d\tau + U_C(0)$ – конденсатордаги кучланиши.

Йиғиндини қайта ҳосил қилиш функцияси қуйидагича бўлади:

$$L_0 \frac{d \Delta I_{\text{дифф}}(t)}{dt} + R_0 \Delta I_{\text{дифф}}(t) + \frac{1}{C_0} \int_0^t \Delta I_{\text{дифф}}(\tau) d\tau + U_C(0) = U_0(t) \quad (3)$$

Агар бошланғич кучланишни $U_C(0) = 0$ деб олсак одатдаги иш режими учун асосли соддалаштириш ҳосил қилинади, яъни:

$$L_0 \frac{d \Delta I_{\text{дифф}}(t)}{dt} + R_0 \Delta I_{\text{дифф}}(t) + \frac{1}{C_0} \int_0^t \Delta I_{\text{дифф}}(\tau) d\tau = U_0(t) \quad (4)$$



Ҳосил қилинган интегралли дифференциал тенглама натижасида Лаплас тенгламаси кўринишида ифодаalayмиз.

2. Бошланғич $\Delta I_{\text{дифф}} = 0$ ва $U_c(0) = 0$ шартлар асосида Лаплас усулини қўлаймиз ва қуйидаги алмаштиришларга эга бўламиз:

$$\mathcal{L}\left\{\frac{d\Delta I_{\text{дифф}}(t)}{dt}\right\} = sI_0(s) \quad (5)$$

$$\mathcal{L}\left\{\int_0^t \Delta I_{\text{дифф}} d\tau\right\} = \left(\frac{1}{s}\right) I_0(s) \quad (6)$$

Ҳосил бўлган тенглама $L_0(sI_0(s)) + R_0I_0(s) + \left(\frac{1}{C_0}\right) \cdot \left(\frac{1}{s}\right) \cdot I_0(s) = U_0(s)$ асосида $I_0(s)$ ни умумий кўринишда чиқарамиз:

$$\left(L_0 \cdot s + R_0 + \left(\frac{1}{C_0}\right)\right) \cdot I_0(s) = U_0(s) \quad (7)$$

Шундан $I_0(s)$ қуйидагича ифодаланади:

$$I_0(s) = \frac{U_0(s)}{L_0 \cdot s + R_0 + \left(\frac{1}{C_0}\right)} \quad (8)$$

(3.8) ифодани эквивалент $Z_0(s) = L_0 \cdot s + R_0 + \left(\frac{1}{C_0}\right)$ қийматидан келиб чиққан ҳолда қуйидаги кўринишга келтирамиз:

$$I_0(s) = \frac{U_0(s)}{Z_0(s)} \quad (9)$$

3. Ўтказиш функцияси $H(s)$ ва конволюция ғоясига таяниб ўтказиш функцияни аниқлаймиз:

$$H(s) = \frac{I_0(s)}{U_0(s)} = \frac{1}{Z_0(s)} \quad (10)$$

Демак, $I_0(s) = H(s) \cdot U_0(s)$ Лаплас назарияси бўйича ҳосил қилинди.

Агар $h(t) = H(s)$ нинг тескари функцияси бўлса, унда чизиқли тизимнинг кириш $U_0(t)$, чиқиш $\Delta I_{\text{дифф}}$ ўртасидаги боғланиш қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$\Delta I_{\text{дифф}} = (h \cdot U_0)(t) = \int_0^t h(t - \tau) U_0(\tau) d\tau \quad (11)$$

Демак, $H(s)$ нинг тескари функцияси $h(t)$ $\Delta I_{\text{дифф}}$ конволюцион интеграл кўринишга келади.

4. $h(t)$ ни Лаплас алмаштиришига ўтган тескари $H(s)$ кўриниши орқали ифодаalayмиз:

$$H(s) = \frac{1}{L_0 s + R_0 + \frac{1}{C_0}} \quad (12)$$

Аввал касрни бирлаштириб қуйидаги умумий кўринишга келтирамиз.

$$L_0 s + R_0 + \frac{1}{C_0} = \frac{(L_0 \cdot C_0^2 + R_0 \cdot C_0 + 1/C_0)}{s} \quad (13)$$

Демак:

$$H(s) = \frac{s}{(L_0 \cdot C_0^2 + R_0 \cdot C_0 + 1/C_0)} \quad (14)$$

бу ерда деноминатор иккинчи тартибли кўпхад.

5. Назорат ва бошқарув тизимини динамик характеристикасини аниқлашда деноминатор илдизлари p_1 ва p_2 ни аниқлаб олимиз.

Деноминаторни нолга тенглаб, илдизларини топамиз:

$$L_0 \cdot s^2 + R_0 \cdot s + \frac{1}{C_0} = 0 \quad (15)$$

Иккинчи тартибли тенгламани илдизларни аниқлаш формуласидан фойдаланиб, диноминатор p_1 ва p_2 илдизларни қуйидаги кўринишда аниқлаймиз:

$$p_{1,2} = \frac{(-R_0 \pm \sqrt{R_0^2 - 4 \cdot L_0 / C_0})}{2L_0} \quad (16)$$



бу p_1 ва p_2 – тизимнинг характеристик илдизлари, одатда манфий ҳақиқий қисмга эга, яъни, ечим сўнувчи экспоненциал бўлади.

Бу илдизлар орқали кўпхадни факторлаб оламиз:

$$L_0 \cdot s^2 + R_0 \cdot s + \frac{1}{C_0} = L_0 \cdot (s - p_1)(s - p_2) \quad (17)$$

Демак, Лаплас алматирешини якуний кўпайтувчиларга ажралган тескари кўриниши қуйидаги ифода орқали аниқланади:

$$H(s) = \frac{s}{(L_0 \cdot (s - p_1)(s - p_2))} = \left(\frac{1}{L_0}\right) \frac{s}{((s - p_1)(s - p_2))} \quad (18)$$

Квадрат тенгламанинг чизиқли кўпайтувчиларга ажралган кўринишини интеграллаш учун А ва В озод ҳадлар орқали касрлар йиғиндиси кўринишига келтириб оламиз.

6. Касрлар усули орқали ифодани қуйидагича аниқлаб оламиз:

$$H(s) = \frac{A}{(s - p_1)} + \frac{B}{(s - p_2)} \quad (19)$$

Демак:

$$\frac{A}{(s - p_1)} + \frac{B}{(s - p_2)} = \frac{[A(s - p_2) + B(s - p_1)]}{((s - p_1)(s - p_2))} = \frac{[(A+B)s - (A \cdot p_2 + B \cdot p_1)]}{((s - p_1)(s - p_2))} \quad (20)$$

Демак, $H(s)$ ни нумераторлар топилгандан сўнг интеграл олиш учун А ва Вни ҳақиқий қийматлари қуйидаги ифодадан келиб чиқиб аниқланади:

$$\left(\frac{1}{L_0}\right) \cdot s = (A + B)s - (A \cdot p_2 + B \cdot p_1) \quad (21)$$

Ҳосил бўлган ифоданинг коэффициентларни солиштириш қуйидагича амалга оширилади[4]:

а) s олдидаги коэффициент: $A + B = \frac{1}{L_0}$;

б) эркин ҳад: $A \cdot p_2 + B \cdot p_1 = 0$.

$A \cdot p_2 + B \cdot p_1 = 0$ ифодадан нумератор А топилганда ифода қуйидаги кўринишга келади:

$$A = -(B \cdot p_1)/p_2 \quad (22)$$

$A + B = \frac{1}{L_0}$ ифодани ҳосил қилинган $A = -(B \cdot p_1)/p_2$ ифода орқали бир номаълумли шаклга келтириб оламиз:

$$-(B \cdot p_1)/p_2 + B = \frac{1}{L_0} \quad (23)$$

$$B \cdot (1 - p_1/p_2) = \frac{1}{L_0} \quad (24)$$

$$B \cdot (p_2 - p_1)/p_2 = \frac{1}{L_0} \quad (25)$$

$$B = p_2/(L_0(p_2 - p_1)) \quad (26)$$

Демак, В нумератори аниқлаб олингандан кейин В нумератор орқали А нумераторни топамиз:

$$A = -(B \cdot p_1)/p_2 = -p_2 \cdot p_1/(L_0(p_2 - p_1) \cdot p_2) = -p_1/(L_0(p_2 - p_1)) = p_1/(L_0(p_1 - p_2)) \quad (27)$$

Шундай қилиб А ва В нумераторлар якуний шакли қуйидаги кўринишга келади:

$$A = p_1/(L_0(p_1 - p_2)) \quad (28)$$

$$B = p_2/(L_0(p_2 - p_1)) = -p_2/(L_0(p_1 - p_2)) \quad (29)$$

Шундай қилиб, А ва В нумераторлари орқали ифодаланган Лапласнинг тескари кўриши ифодаси қуйидаги якуний кўринишга келади:

$$H(s) = A/(s - p_1) + B/(s - p_2) = 1/(L_0(p_1 - p_2)) \cdot (p_1/(s - p_1)) \cdot (p_2/(s - p_2)) \quad (30)$$

7. Тескари Лаплас – $h(t)$ ни топиш

Стандарт формула:



$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{(s-p)}\right\} = e^{\{p \cdot t\}}, t \geq 0 \quad (31)$$

Шунинг учун:

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{p_1}{(s-p_1)}\right\} = p_1 \cdot e^{\{p_1 \cdot t\}} \quad (32)$$

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{p_2}{(s-p_2)}\right\} = p_2 \cdot e^{\{p_2 \cdot t\}} \quad (33)$$

Демак, импульс характеристика:

$$h(t) = \mathcal{L}^{-1}\{H(s)\} = \left[1/(L_0 \cdot (p_1 - p_2))\right] \cdot (p_1 \cdot e^{\{p_1 \cdot t\}} - p_2 \cdot e^{\{p_2 \cdot t\}}), t \geq 0$$

$$h(t) = (p_1 \cdot e^{\{p_1 \cdot t\}} - p_2 \cdot e^{\{p_2 \cdot t\}})/(L_0 \cdot (p_1 - p_2)), t \geq 0 \quad (34)$$

Бу нол кетма-кетлик $R_0 - L_0 - C_0$ занжирининг импульс характеристикаси.

8. Конволюция усули орқали $\Delta I_{\text{дифф}}$ ни аниқ интеграл формуласини якуний кўринишини куйидагича ёзиб оламиз:

$$\Delta I_{\text{дифф}} = \int_0^t h(t - \tau) \cdot U_0(\tau) d\tau \quad (35)$$

Демак, нолли кетма-кетлик токи $\Delta I_{\text{дифф}}$ ни топиш функциясида $h(t - \tau)$ ни деноменатор қийматларига тенглаштириш куйидаги ифода орқали амалга оширилади:

$$h(t - \tau) = (p_1 \cdot e^{\{p_1 \cdot (t - \tau)\}} - p_2 \cdot e^{\{p_2 \cdot (t - \tau)\}})/(L_0 \cdot (p_1 - p_2)) \quad (36)$$

Натижада якуний $\Delta I_{\text{дифф}}$ ни U_0 га боглиқлик функциясини вақт орқали ифодалаб, электр тармоқларида юзага келадиган бир фазали ерга туташув ҳодисаларини олдини олувчи назорат ва бошқарув тизими учун ишлаб чиқилган математик модел кўйидагича ифодалангани[5]:

$$\Delta I_{\text{дифф}} = \int_0^t \frac{p_1 \cdot e^{\{p_1 \cdot (t - \tau)\}} - p_2 \cdot e^{\{p_2 \cdot (t - \tau)\}}}{(L_0 \cdot (p_1 - p_2))} \cdot U_0(\tau) d\tau \quad (37)$$

Кончилик корхоналари энергетика тизимининг электр тармоғида бир фазали ерга туташув бор ёки йўқлигини чегаравий қийматлари U_0 , $\Delta I_{\text{дифф}}$ лар билан белгилаб олинади, агар уларнинг қийматлари катта бўлса ва икки қатъий тенгсизлик ҳам қаноатлантирилса қисқа туташув мавжудлиги сигнали орқали берилади.

$$\begin{cases} U_0 > U_{\text{чегара}} \\ \Delta I_{\text{дифф}} > I_{\text{ўрн}} \end{cases}$$

Агар бу шартлар бажарилмаса ёки биттаси бажарилса ҳам сигнал ёлғон деб қаралади ва бу бир фазали туташув сифатида қаралмайди.

$$\begin{cases} U_0 < U_{\text{чегара}} \\ \Delta I_{\text{дифф}} < I_{\text{ўрн}} \end{cases} \quad \begin{cases} U_0 > U_{\text{чегара}} \\ \Delta I_{\text{дифф}} < I_{\text{ўрн}} \end{cases} \quad \begin{cases} U_0 < U_{\text{чегара}} \\ \Delta I_{\text{дифф}} > I_{\text{ўрн}} \end{cases}$$

Кончилик корхоналари энергетика тизимининг электр тармоқларида юзага келадиган бир фазали ерга туташув ҳодисалари оқибатида технологик жараёнларни тўхтаб қолишини олдини олиш имконини берувчи назорат ва бошқарув тизимлари учун ишлаб чиқилган математик модел унинг селектив ишлашини таъминлашга хизмат қилади ҳамда таклиф этилаётган назорат ва бошқарув тизимининг алгоритми ва имитацион моделини ишлаб чиқиш имконини беради[6].

Фойдаланилган адабиётлар рўйхати:

[1] Г. Таткеева, И. Курабаев, Н. Атауллаев и Х. Муродов, "Экспериментальное исследование разработанного метода определения сетевой изоляции для незаземленных систем переменного тока в лабораторных условиях", 2022 Международная конференция по электрическим, компьютерным и энергетическим технологиям (ICESET), Прага, Чешская Республика, 2022, стр. 1-4, doi: 10.1109/ICESET55527.2022.9873012.



- [2] Каршибаев А., Атауллаев Н. Методология разработки измерительного блока разработанной микропроцессорной защитной установки от озн в энергетических системах горной промышленности // International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences. 2025. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodologiya-razrabotki-izmeritelnogo-bloka-razrabotannoy-mikroprotsessornoy-zaschitnoy-ustanovki-ot-ozn-v-energeticheskikh-sistemah>.
- [3] Буль О.Б., Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / М.: Издательский центр «Академия», 2005. —336 с.
- [4] Бычин М.А., Разработка и обоснования алгоритмов действия защит от однофазных замыканий на землю в сетях с резистивно-заземленной нейтралью: дис. на соискание уч. ст. канд. тех. наук: 05.09.03 /- СПб, 2010. – 160 с.
- [5] Фризен В.Э. и др. Методы расчета электрических и магнитных полей : учебный М74 комплект // Екатеринбург : УрФУ, 2014. - 176 с.
- [6] Andréia da Silva Santos, Lucas Teles Faria, Mara Lúcia M Lopes, Anna Diva P Lotufo, Carlos R Minussi, Efficient Methodology for Detection and Classification of Short-Circuit Faults in Distribution Systems with Distributed Generation // Sensors (Basel). 2022 Dec 2;22(23):9418.